

Запорожский национальный технический университет

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ СЕНСОРОВ ТОКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ГРАФИТАЦИИ

Исследовано влияние конструктивных факторов на погрешность сенсоров тока с поясами Роговского, размещенными на токоподводах печи графитации переменного тока. На основе математического моделирования электромагнитных полей выполнена количественная оценка составляющих погрешности, разработана методика расчета с использованием корректирующих коэффициентов, обеспечивающая высокую точность измерений.

Досліджено вплив конструктивних факторів на похибку сенсорів струму з поясами Роговського, які розташовані на струмовідводах печі графітації змінного струму. На основі математичного моделювання електромагнітних полів виконано кількісну оцінку складових похибки, розроблено методику розрахунку з використанням корегуючих коефіцієнтів, що забезпечує високу точність вимірювань.

The influence of structural factors on the accuracy of current sensors with magnetic coil, which placed on the electrodes of the graphitization furnace AC, is investigated. The mathematical modeling of the electromagnetic fields for a quantitative measurement of error components is proposed. The high accuracy calculation method with using the correction coefficients is presented.

Современный этап развития металлургической промышленности Украины характеризуется острой конкуренцией на внешнем и внутреннем рынках, которая устанавливает высокие требования к себестоимости электродной продукции и ее качеству. В электродном производстве наиболее энергоемким является технологический процесс графитации, который, как правило, осуществляется в печах графитации переменного тока (печи Ачесона) с удельными энергозатратами до 6 МВт·час на тонну продукции [2]. С учетом продолжительности этого процесса, достигающей 40 – 45 часов, особое внимание следует уделять повышению энергоэффективности электротехнического комплекса графитации.

При реализации программной стратегии автоматизированного управления технологическим процессом графитации контроль мощности и энергозатрат осуществляется измерительными приборами, включенными в цепи трансформаторов тока и напряжения с высокой стороны питающих и компенсационных трансформаторов. Такие измерения не обеспечивают непосредственной связи с технологическим оборудованием и не позволяют контролировать активную мощность печи Ачесона и прямые энергозатраты на технологический процесс графитации. Поэтому разработка сенсорных систем измерения токов для автоматизированного управления технологическим процессом графитации, размещенных непосредственно со стороны печи графитации в зоне действия сильных электромагнитных полей и высоких температур, является актуальной задачей, как в практическом, так и в научном плане.

Сенсоры тока для вторичных токопроводов и токоподводов печей графитации Ачесона должны удовлетворять требованиям высокой точности, надежности и перегрузочной способности, электрической и

термической стойкости. Известные сенсоры тока ведущих мировых производителей, например, фирмы АВВ [3], измеряющие, как правило, мгновенные значения на основе эффекта Холла, не обеспечивают измерения при высоких рабочих температурах токоподводов печей графитации (до 400 °С). Этому требованию удовлетворяют сенсорные системы, использующие специальные датчики тока – магнитные пояса Роговского с обмотками из нихрома [4,5]. Однако, для промышленного внедрения таких систем необходимо выполнить оценку точности, которая зависит от особенностей конструкции магнитного пояса, намотки измерительной обмотки, влияния внешних, по отношению к токоподводам, электромагнитных полей. Учитывая, что проведение экспериментальных исследований на элементах печной петли электротехнического комплекса и токоподводах печи графитации, ограничено по производственным условиям, целесообразно использовать для этого обобщенные подходы на основе математических моделей электромагнитного поля [1,6].

Целью работы является исследование погрешности сенсоров с магнитными поясами Роговского для измерения больших переменных токов на основе математических моделей электромагнитного поля в области токоподводов печи графитации, позволяющих учесть особенности конструкции магнитного пояса, намотки его измерительной обмотки, влияние внешнего поверхностного эффекта от токоведущих элементов печной петли.

Магнитное поле, которое создается измеряемым током, токами соседних токоподводов и трубошин боковой ошиновки (рис.1), наводит в поясе Роговского ЭДС. Эта ЭДС уравнивается падениями напряжения в измерительной обмотке, подводящих проводах, выполненных в виде экранированной витой пары, и входном сопротивлении регистратора:

$$\frac{d\Psi}{d\tau} + L_{\text{int}} \cdot \frac{di}{d\tau} + (r + r_{\text{int}} + R_{\text{ent}}) \cdot i + \frac{1}{C_{\text{int}}} \int id\tau = 0, \quad (1)$$

где Ψ – потокосцепление измерительной обмотки, $r_{\text{int}}, L_{\text{int}}, C_{\text{int}}$ – активное сопротивление, индуктивность и паразитная емкость измерительной обмотки, r, R_{ent} – активное сопротивление витой пары и входное сопротивление контролера.

Для расчета распределения индукции магнитного поля применяется математическая модель, которая описывается системой дифференциальных уравнений для амплитуд векторного магнитного потенциала в комплексной форме [1]:

$$\begin{cases} j\omega\sigma(\theta)_j \dot{\mathbf{A}}_j + \nabla[(\mu_0\mu_j)^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}_j] = \\ = \frac{\sigma(\theta)_j \Delta U_j}{l}, j = 1, 2; \\ j\omega\sigma(\theta)_j \dot{\mathbf{A}}_j + \nabla[(\mu_0\mu_j)^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}_j] = 0, \\ j = 3; \\ \dot{\mathbf{B}}_j = \text{rot}(\dot{\mathbf{A}}_j), \\ j = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (2)$$

где σ, μ – удельная электропроводность и относительная магнитная проницаемость материалов; ω – угловая частота. Индексы $j = 1, 2, 3$ – соответствуют подобластям токоподводов, боковых шин и окружающей среды (рис.1). Температурные зависимости проводимостей графитовых токоподводов и боковых шинных пакетов $\sigma(\theta)_j (j = 1, 2)$ определялись по данным экспериментальных измерений температур в производственных условиях.

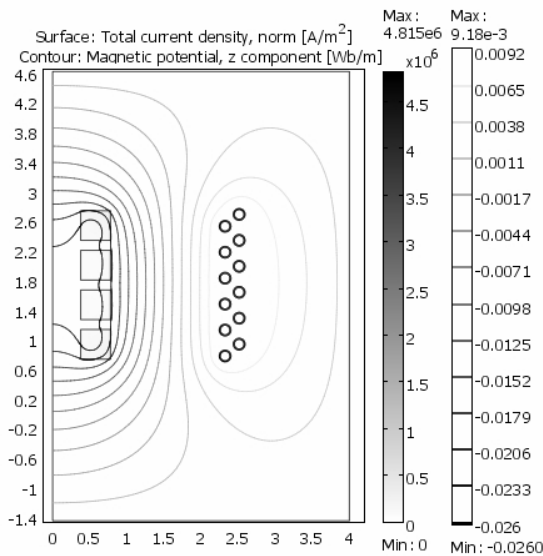


Рис.1. Распределение плотности тока и векторного магнитного потенциала в расчетной области

Система уравнений (2) замыкается условиями Кулона

$$\text{div} \dot{\mathbf{A}} = 0, \quad (3)$$

условиями на границах сопряжения сред с различными электромагнитными свойствами

$$\mathbf{n}_{i,k} \times (\dot{\mathbf{H}}_i - \dot{\mathbf{H}}_k) = 0, (i, k) = \{(1,3), (2,3)\}, \quad (4)$$

и условиями магнитной изоляции на внешних границах расчетной области [1]

$$\dot{\mathbf{A}}_k = 0, \quad (5)$$

где индексами i, k обозначаются внутренние и внешние границы подобластей в расчетной области; \mathbf{n} – вектор нормали к граничной поверхности подобласти

Для решения системы уравнений (2) с граничными условиями (3) – (5) применялся универсальный метод конечных элементов, реализованный в структуре COMSOL Multiphysics [6]. Расчеты проводились для двухрядного исполнения боковых шинных пакетов из двенадцати полых алюминиевых труб с каждой стороны ядра (рис. 1). Внешние границы расчетной области располагались на достаточном удалении, чтобы пренебречь их влиянием на электромагнитное поле. Плотность распределения конечных элементов увеличивалась на границах сопряжения подобластей, чтобы обеспечить требуемую точность расчетов.

По расчетным данным определялась комплексная амплитуда электрического тока в токоподводах и шинах

$$\dot{\mathbf{I}}_m = \iint_S (\dot{\mathbf{s}}, d\mathbf{S}),$$

распределение комплексных амплитуд составляющих напряженности магнитного поля

$$\vec{\mathbf{H}} = \mathbf{i} \cdot \dot{\mathbf{H}}_x(x, y) + \mathbf{j} \cdot \dot{\mathbf{H}}_y(x, y)$$

и составляющих индукции

$$\vec{\mathbf{B}} = \mu_0 \cdot \vec{\mathbf{H}} = \mathbf{i} \cdot \mu_0 \cdot \dot{\mathbf{H}}_x + \mathbf{j} \cdot \mu_0 \cdot \dot{\mathbf{H}}_y.$$

Погрешность пояса Роговского зависит от размеров витка измерительной обмотки, его наклона при намотке, от неравномерности распределения витков по периметру пояса. Для оценки составляющих погрешности, обусловленных этими конструктивными факторами, по результатам полевых расчетов определяется комплексная амплитуда потокосцепления измерительной обмотки для кольцевого исполнения пояса Роговского с угловой плотностью намотки витков w_α

$$\dot{\Psi}_m = \int_\alpha^{\alpha+\gamma} \dot{\Phi}_m w_\alpha d\alpha \quad (6)$$

и для рамочного исполнения пояса с линейной плотностью намотки витков w_Δ

$$\dot{\Psi}_m = \int_\Delta^{\Delta+\Delta_\gamma} \dot{\Phi}_m w_\Delta dl, \quad (7)$$

где

$$\dot{\Phi}_m = \iint_{S_g} (\dot{\mathbf{B}}, d\mathbf{S}) \quad (8)$$

– комплексная амплитуда магнитного потока, S_g – поперечное сечение витка обмотки.

Выражение (8) для цилиндрической спиральной обмотки измерительной обмотки

$$\dot{\Phi}_{m(l,r)} = \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}+d_g} \dot{\mathbf{B}} \cdot \sqrt{\frac{d_g^2}{4} - \left(\frac{d_g}{2} - \left(r - \frac{h}{2}\right)\right)^2} dr, \quad (9)$$

где d_g - диаметр витка, h - внутренний диаметр (размер) измерительной обмотки.

Таким образом, соотношения (6), (7) с учетом выражения (9) можно преобразовать к виду:

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}_m &= \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \dot{\Phi}_{m(\alpha,r)} \cdot w_{\Delta} dl = \\ &= w_{\alpha} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \left[\int_{h/2}^{\frac{h}{2}+d_g} \dot{B}_{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{d_g^2}{4} - \left(\frac{d_g}{2} - \left(r - \frac{h}{2} \right) \right)^2} dr \right] d\alpha \end{aligned} \quad (10)$$

- для кольцевого исполнения пояса и постоянной угловой плотности намотки витков - $w_{\alpha} = w/\gamma = const_{\gamma}$,

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}_m &= \int_{\Delta}^{\Delta+\Delta_l} \dot{\Phi}_{m(l,r)} \cdot w_{\Delta} dl = \\ &= w_{\Delta} \int_{\Delta}^{\Delta+\Delta_l} \left[\int_{h/2}^{\frac{h}{2}+d_g} \dot{B}_l \cdot \sqrt{\frac{d_g^2}{4} - \left(\frac{d_g}{2} - \left(r - \frac{h}{2} \right) \right)^2} dr \right] dl \end{aligned} \quad (11)$$

- для рамочного исполнения пояса и постоянной линейной плотности намотки витков $w_{\Delta} = w/\Delta_l = const_{\Delta}$, где \dot{B}_{α} , \dot{B}_l - комплексные амплитуды составляющих вектора индукции магнитного поля (рис. 2).

В соответствии с интегральными соотношениями (10), (11) из дифференциального уравнения (1) можно определить комплексную амплитуду тока в измерительной обмотке

$$\dot{I}_{om} = j\omega \cdot \dot{\Psi}_m / \left((r + r_{int} + R_{ent}) + j \cdot \omega \cdot L + \frac{1}{j\omega C} \right) \quad (12)$$

и комплексную амплитуду напряжения на входе регистратора

$$\dot{U}_{om} = \left[\frac{j \cdot \omega \cdot \dot{\Psi}_m}{\left((r + r_{int} + R_{ent}) + j \cdot \omega \cdot L + \frac{1}{j\omega C} \right)} \right] \cdot R_{ent} \quad (13)$$

Так как $\dot{\Psi}_m = \dot{\Psi}_m(\dot{I}_m)$, то $\dot{I}_{om} = \dot{I}_{om}(\dot{I}_m)$, $\dot{U}_{om} = \dot{U}_{om}(\dot{I}_m)$, где \dot{I}_m - комплексная амплитуда измеряемого тока. При условии, что

$$\forall \left\{ \frac{r}{R_{ent}}, \frac{r_{int}}{R_{ent}}, \frac{\omega \cdot L}{R_{ent}}, \frac{1}{\omega \cdot C \cdot R_{ent}} \right\} \ll 1,$$

соотношения (12), (13) приводятся к виду:

$$\dot{I}_{om} \approx j\omega \cdot \dot{\Psi}_m / R_{ent} \approx k_I \cdot \dot{I}_m, \quad (14)$$

$$\dot{U}_{om} \approx j\omega \cdot \dot{\Psi}_m \approx k_U \cdot \dot{I}_m. \quad (15)$$

Относительную погрешность измерительного пояса Роговского, обусловленную конечными размерами витка обмотки, можно определить

$$\varepsilon_g = \frac{\left| \dot{I}_{om}|_{d_g} - \dot{I}_{om}|_{d_g \ll h} \right|}{\left| \dot{I}_{om}|_{d_g \ll h} \right|} = \frac{\left| \dot{U}_{om}|_{d_g} - \dot{U}_{om}|_{d_g \ll h} \right|}{\left| \dot{U}_{om}|_{d_g \ll h} \right|}$$

или с учетом соотношений (14), (15)

$$\varepsilon_g = \frac{\left| \left| \dot{\Psi}_{om}|_{d_g} - \dot{\Psi}_{om}|_{d_g \ll h} \right| \right|}{\left| \dot{\Psi}_{om}|_{d_g \ll h} \right|}, \quad (16)$$

где для кольцевого исполнения измерительного пояса Роговского

$$\dot{\Psi}_{om}|_{d_g \ll h} = w \cdot \frac{\pi d_g^2}{4} \cdot \dot{B}_{\alpha},$$

для рамочного исполнения пояса

$$\dot{\Psi}_{om}|_{d_g \ll h} = \frac{w}{\Delta_l} \cdot \frac{\pi d_g^2}{4} \cdot \int_{\Delta}^{\Delta+\Delta_l} \dot{B}_l dl.$$

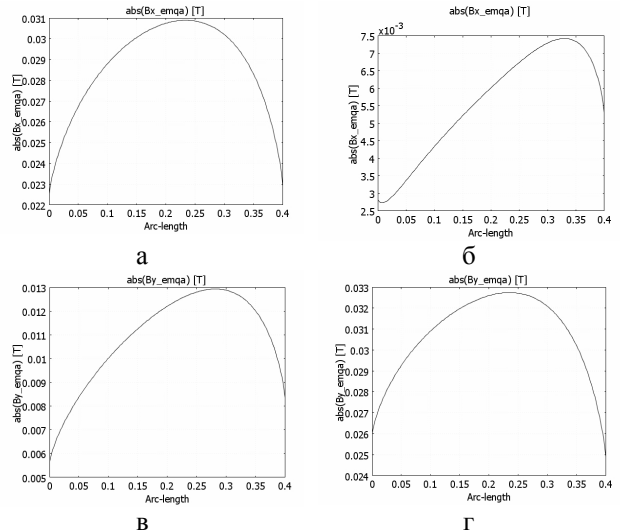


Рис.2. Распределение составляющих индукции магнитного поля по периметру поперечного сечения токоподвода: а - $B_{xm(top)}$; б - $B_{xm(bottom)}$, в - $B_{ym(left)}$, г - $B_{ym(right)}$

Зависимость погрешности ε_g от относительных размеров витка обмотки $\delta_g = d_g/h$ является нелинейной. Однако при $0 < \delta_g < 0,01$ ее можно линеаризовать (рис. 3).

Отношение диаметра намотки к характерному размеру токоподвода или трубошины δ_g становится определяющим при повышении класса точности. Для пояса Роговского класса точности 0,1 эта составляющая погрешности будет достигать 45 % от общей погрешности измерений при $\delta_g = 0,01$.

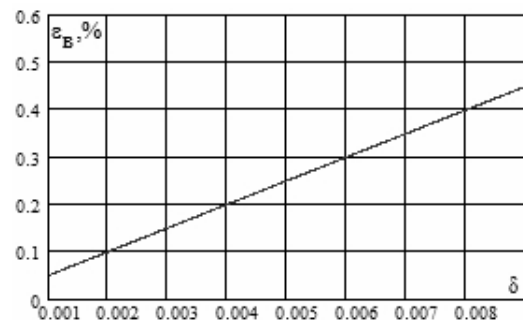


Рис.3. Зависимость относительной погрешности ε_g , % от относительного размера витка измерительной обмотки δ_g пояса Роговского

Таким образом, при измерении токов поясом Роговского класса точности 0,1, если сторона квадрата поперечного сечения графитового токоподвода печи Ачесона равна 400 мм, то диаметр витка его измерительной обмотки не должен превышать 4 мм. А для трубошин с наружным диаметром 160 мм диаметр витка измерительной обмотки не должен превышать 1,6 мм. В этом случае должны применяться ленточные пояса Роговского с намоткой измерительной обмотки прямоугольной формы.

Для класса точности 0,5 влияние конечных размеров витка обмотки менее существенно, а для классов точности 1, 1,5, 2,5 и 4 влиянием этого конструктивного фактора можно пренебречь и рассматривать виток обмотки как точечный измерительный элемент.

Для линейного участка зависимости $\varepsilon_\phi = \varepsilon_\phi(\delta_\phi)$ (рис.3) можно ввести корректирующий коэффициент, учитывающий влияние относительного размера витка обмотки

$$k_\phi = \frac{|\Psi_{om}|_{d_\phi}}{|\dot{\Psi}_{om}|_{d_\phi < h}}, \quad (17)$$

значения которого изменяются от 1,005 до 1,047 на отрезке $\delta_\phi \in [0,01; 0,1]$.

При постоянной плотности намотки витков секций пояса Роговского появляются безвитковые секторы для вывода измерительных проводов при кольцевом односекционном исполнении сенсора тока и для перехода от одной секции к другой при его рамочном исполнении (рис. 4).

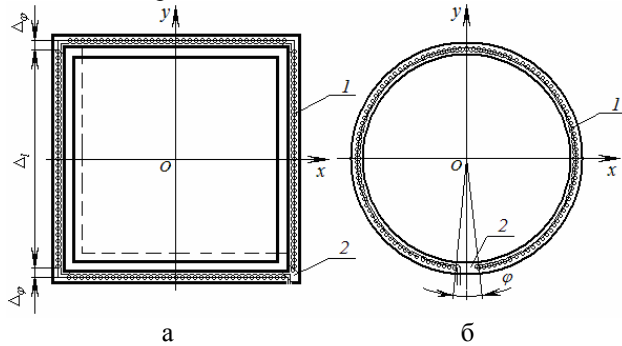


Рис.4. Пояс Роговского с безвитковыми секторами (1 – витковый сектор, 2 – безвитковый сектор): а – рамочное исполнение, б – кольцевое исполнение

Влияние безвиткового сектора учитывается изменением нижних $\alpha \rightarrow \alpha + \varphi/2$, $\Delta \rightarrow \Delta + \Delta_\phi$ и верхних $\alpha \rightarrow \alpha + \gamma - \varphi/2$, $\Delta \rightarrow \Delta + \Delta_l - \Delta_\phi$ пределов интегрирования в соотношениях (10), (11).

Для оценки влияния безвитковых секторов на погрешность пояса Роговского целесообразно перейти к безразмерному параметру их длины как для рамочного исполнения пояса Роговского

$$l_\phi = \frac{2 \cdot \Delta_\phi}{\Delta_l},$$

так и для кольцевого исполнения пояса Роговского

$$l_\phi = \frac{\varphi}{2\pi}.$$

В этом случае относительную погрешность сенсора тока, обусловленную наличием безвитковых секторов, можно оценить выражением

$$\varepsilon_\phi = \frac{\left| \Psi_{om}|_{l_\phi \neq 0} - \dot{\Psi}_{om}|_{l_\phi = 0} \right|}{\left| \dot{\Psi}_{om}|_{l_\phi = 0} \right|}. \quad (18)$$

Зависимость относительной погрешности $\varepsilon_\phi = \varepsilon_\phi(l_\phi)$ от безразмерного параметра длины безвитковых секторов имеет линейный характер и при относительной длине безвиткового сектора обмотки пояса равной 0,01 составляет 1,45%, при 0,02 – 2,9% (рис.5).

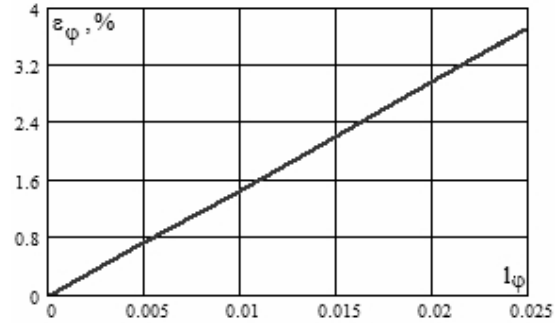


Рис.5. Зависимость относительной погрешности пояса Роговского от безразмерного параметра длины безвитковых секторов измерительной обмотки

Для повышения точности измерения тока поясом Роговского с безвитковыми секторами необходимо ввести корректирующий коэффициент

$$k_\phi = \frac{|\Psi_{om}|_{l_\phi \neq 0}}{|\dot{\Psi}_{om}|_{l_\phi = 0}}, \quad (19)$$

значения которого изменяются от 1,015 до 1,038 на отрезке $l_\phi \in [0,01; 0,025]$.

Угол наклона витка спиральной измерительной обмотки пояса Роговского определяется шагом спирали h_b и диаметром витка обмотки

$$\theta_b = 2 \cdot \arctg\left(\frac{h_b}{2 \cdot d_b}\right).$$

Для определения потокосцепления измерительных обмоток можно применить интегральные выражения (10), (11), если выполнить замены для кольцевого исполнения пояса Роговского

$$\dot{B}_\alpha = \dot{B}_y \cdot \cos(\theta_b) + \dot{B}_r \cdot \sin(\theta_b),$$

и для рамочного исполнения

$$\dot{B}_i = \begin{cases} \dot{B}_x \cdot \cos(\theta_b) + \dot{B}_y \cdot \sin(\theta_b), & \text{при } \dot{B}_i = \dot{B}_i(x), \\ \dot{B}_y \cdot \cos(\theta_b) + \dot{B}_x \cdot \sin(\theta_b), & \text{при } \dot{B}_i = \dot{B}_i(y). \end{cases}$$

В этом случае относительную погрешность сенсора тока, обусловленную углом наклона витка измерительной обмотки θ_b , можно описать

$$\varepsilon_\theta = \frac{\left| \dot{\Psi}_{om}|_{\theta \neq 0} - \dot{\Psi}_{om}|_{\theta = 0} \right|}{\left| \dot{\Psi}_{om}|_{\theta \neq 0} \right|}. \quad (20)$$

Зависимость относительной погрешности ε_θ от угла наклона витков измерительной обмотки имеет нелинейный характер и при θ_n равном 4° она составляет 0,06%, а при θ_n равном 7° – 0,4% (рис.6).

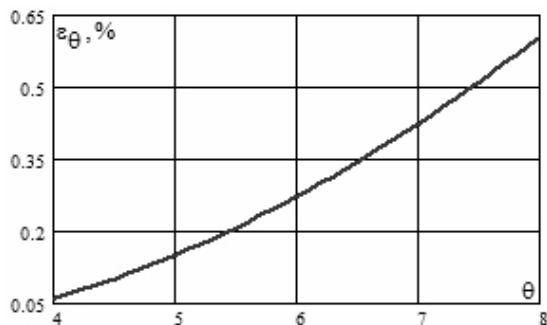


Рис.6. Зависимость относительной погрешности от угла наклона витка измерительной обмотки θ_n .

Влияние этой составляющей погрешности на значения измеряемого тока можно учесть с помощью корректирующего коэффициента

$$k_\theta = \frac{|\Psi_{om}|_{\theta \neq 0}}{|\Psi_{om}|_{\theta = 0}}, \quad (21)$$

значения которого изменяются от 1,006 до 1,042 на отрезке $\theta \in [4^\circ, 7^\circ]$.

При проектировании сенсоров тока с поясами Роговского на основе соотношений (14), (15) влияние конструктивных факторов на погрешность измерений должно компенсироваться с помощью корректирующих коэффициентов, которые рассчитываются по соотношениям (17), (19), (21). Таким образом

$$\dot{I}_{om} = k_\varepsilon \cdot k_\varphi \cdot k_\theta \cdot k_I \cdot \dot{I}_m, \quad (22)$$

$$\dot{U}_{om} = k_\varepsilon \cdot k_\varphi \cdot k_\theta \cdot k_U \cdot \dot{I}_m. \quad (23)$$

Расчетные соотношения (22), (23) позволяют учесть влияние рассмотренных конструктивных факторов на точность измерений и исключить соответствующие составляющие погрешности, которые определяются соотношениями (16), (18), (20).

Изложенная выше методика обеспечила проектирование сенсоров тока и изготовление на ОАО «ЗЗВА» контрольно-измерительного комплекса класса точности 0,5 для автоматизированной системы управления технологическим процессом графитации заготовок электродов в печах Ачесона.

По данным опытно-промышленной эксплуатации этого комплекса на ОАО «Укрграфит» установлено, что использование сенсоров тока с поясами Роговского на токоподводах печи графитации для управления технологическим процессом исключает ввод избыточный активной мощности, снижает ее максимум на 8 – 12 % и, соответственно, повышает энергоэффективность графитации электродов в печах переменного тока.

Список использованной литературы

1. Идентификация характеристик системы резистивно-индукционного нагрева для транспортировки хлора методами математического моделирования / С.Т. Ярымбаш, И.М. Килимник, Д.С. Ярымбаш, Д.А. Литвинов // Материалы МНТК «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Харьков, 2010. – С. 320-324.
2. Чалых Е.Ф. Оборудование электродных заводов / Е.Ф. Чалых – М.: Металлургия, 1990. – 238 с.
3. Чекмарев А. Датчики тока и напряжения АВВ — от печатной платы до преобразователей-гигантов / А. Чекмарев // Силовая электроника. – 2006. – № 3. – С.124-125.
4. Ярымбаш Д.С. Особенности измерения переменного тока в токоподводах печей графитации / Д.С.Ярымбаш // Электротехника и электроэнергетика. – 2005. – № 1. – С. 74-76.
5. Ярымбаш Д.С. Особенности контроля электрических параметров, мощности и энергопотребления во время кампании / Д.С. Ярымбаш, С.Т. Ярымбаш, А.В. Тютюнник // Вісн. Кременчуцького держ. політехн. ун-ту. – 2006. – Вип. 3/2006(38).
6. Ярымбаш С.Т. Особенности электротепловых режимов главных шинных пакетов секций печей графитации переменного тока / С.Т. Ярымбаш, И.М. Килимник, Д.С. Ярымбаш // Электротехника и электроэнергетика. – 2010. – № 1. – С. 64-69.

Получено 12.07.2011



Ярымбаш Дмитрий Сергеевич,
к.т.н., доц. Запорожск.
нац. техн. ун-та,
69063, г. Запорожье,
ул. Жуковского, 64,
тел. (061) 769-82-81



Килимник Ирина Михайловна,
к.т.н., доц. Запорожск.
нац. техн. ун-та,
69063, г. Запорожье,
ул. Жуковского, 64,
тел. (061) 769-84-46



Ярымбаш Сергей Тимофеевич,
к.т.н., проректор Запорожск.
нац. техн. ун-та,
69063, г. Запорожье,
ул. Жуковского, 64,
тел. (061) 764-15-19